

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-1-62-70

УДК 625.731.82

EDN: IXDZAO

Научная статья / Research article

Влияние ультрадисперсных добавок на механические свойства бетона

М.Ю. Малькова¹✉, А.С. Горшков¹, А.Н. Задиранов², Е.А. Ларионов¹¹ Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация² Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация

✉ marianna300@yandex.ru

Поступила в редакцию: 11 ноября 2024 г.

Принята к публикации: 30 января 2025 г.

Аннотация. Исследование направлено на оценку механических характеристик бетона, модифицированного ультрадисперсными порошками, произведенными из строительных отходов методом тонкого помола. Для достижения цели были изготовлены и испытаны образцы бетона с различным содержанием ультрадисперсных порошков в цементной матрице. Механические свойства образцов оценивались по показателям прочности на сжатие и модулю упругости. Испытания проводились на образцах бетона, выдержанных в течение 7, 14, 21 и 28 сут, с последующим анализом средних значений трех измерений для каждой временной точки. Результаты исследования показали, что бетонные смеси, содержащие ультрадисперсные порошки, обладают улучшенными механическими характеристиками по сравнению с контрольными образцами. Оптимальное содержание ультрадисперсных порошков составляет 20 % от массы цемента. Прочность на сжатие таких бетонных образцов через 28 дней твердения превосходит контрольные значения на 46 %. Это свидетельствует о возможности использования ультрадисперсных порошков для повышения эксплуатационных качеств бетонных конструкций. В рамках экспериментальных исследований установлено, что размер, концентрация и химический состав ультрадисперсных частиц существенно влияют на механические свойства бетонных смесей, модифицированных ультрадисперсными порошками строительных отходов.

Ключевые слова: бетон, ультрадисперсные порошки, строительные отходы, битый кирпич

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. — обоснование и концепция исследования; Горшков А.С. — выполнение экспериментов; Ларионов Е.А. — обработка данных экспериментов.

Для цитирования: Малькова М.Ю., Горшков А.С., Задиранов А.Н., Ларионов Е.А. Влияние ультрадисперсных добавок на механические свойства бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 1. С. 62–70. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-1-62-70>

Малькова Марианна Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 2680-1505, ORCID: 0000-0002-6939-1658; e-mail: marianna300@yandex.ru

Горшков Александр Сергеевич, ассистент кафедры архитектуры, реставрации и дизайна, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 3987-3902, ORCID: 0000-0002-8844-7397; e-mail: gorshkov_as@pfur.ru

Задиранов Александр Никитович, доктор технических наук, профессор кафедры общей и специальной химии, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Российская Федерация, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 2873-6465, ORCID: 0000-0001-7787-8290; e-mail: zadiranov@mail.ru

Ларионов Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий строительства и конструкционных материалов, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY AuthorID: 365207, ORCID: 0000-0002-4906-5919; e-mail: evgenylarionov39@yandex.ru

© Малькова М.Ю., Горшков А.С., Задиранов А.Н., Ларионов Е.А., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Effect of Ultrafine Additives on Mechanical Properties of Concrete

Marianna Yu. Malkova¹✉, Alexander S. Gorshkov¹,
Alexander N. Zadiranov², Evgeny A. Larionov¹

¹ RUDN University, Moscow, Russian Federation

² Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

✉ marianna300@yandex.ru

Received: November 11, 2024

Accepted: January 30, 2025

Abstract. The study is aimed at assessing the mechanical properties of concrete modified with ultrafine powders produced from construction waste by fine grinding. To achieve this goal, concrete samples with different contents of ultrafine powders in the cement matrix were prepared and tested. The mechanical properties of the samples were assessed in terms of compressive strength and modulus of elasticity. The tests were carried out on concrete samples aged for 7, 14, 21 and 28 days, followed by an analysis of the average values of the three measurements for each time point. The results of the study showed that concrete mixtures containing ultrafine powders have improved mechanical properties compared to control samples. The optimal content of ultrafine powders is 20% of the cement weight. The compressive strength of such concrete samples exceeds the reference values by 46% after 28 days of hardening. This indicates the possibility of using ultrafine powders to improve the performance of concrete structures. Experimental studies have shown that the size, concentration, and chemical composition of ultrafine particles significantly affect the mechanical properties of concrete mixtures modified with ultrafine powders of construction waste

Keywords: concrete, ultrafine powders, construction waste, broken brick

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: Malkova M.Yu., Zadiranov A.N. — the rationale and concept of the study; Gorshkov A.S. — performing experiments; Larionov E.A. — experiment data processing.

For citation: Malkova M.Yu., Gorshkov A.S., Zadiranov A.N., Larionov E.A. Effect of ultrafine additives on mechanical properties of concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(1):62–70. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-1-62-70>

1. Введение

Для улучшения эксплуатационных характеристик бетона в его состав вводят различного рода добавки. Как отмечают многие исследователи, использование частиц ультрадисперсных размеров для модифицирования бетонной смеси существенно улучшает ее механические свойства. Это связано с высокой реакционной активностью ультрадисперсных частиц, которая обусловлена значительной удельной площадью их поверхности [1–5].

Все большее внимание в технологиях изготовления бетона уделяется использованию наноматериалов. В производстве наноразмерных материалов используются оксиды металлов, углеродные нанотрубки и волокна. Популярной и эффективной минеральной добавкой для изготовления бетона с высокими эксплуатационными характеристиками является нанокремнезем, способный значительно улучшить механические свойства бетона благодаря своей пуццолановой активности и сверхтонкому размеру частиц [6–8]. Как показывают различные научные исследования, введение нанокремнезема

Marianna Yu. Malkova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2680-1505, ORCID: 0000-0002-6939-1658; e-mail: marianna300@yandex.ru

Alexander S. Gorshkov, Assistant of the Department of Architecture, Restoration and Design, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3987-3902, ORCID: 0000-0002-8844-7397; e-mail: gorshkov_as@pfur.ru

Alexander N. Zadiranov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety (Moscow), State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation; eLIBRARY SPIN code: 2873-6465, ORCID: 0000-0001-7787-8290; e-mail: zadiranov@mail.ru

Evgeny A. Larionov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Engineering Academy, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY AuthorID: 365207, ORCID: 0000-0002-4906-5919; e-mail: evgenylarionov39@yandex.ru

в бетон приводит к повышению прочности на сжатие [9–11], увеличению прочности при растяжении и изгибе [5; 12–13] по сравнению с традиционными бетонными смесями. В [14] установлено, что оптимальное содержание нанокремнезема в бетоне зависит от размера удельной поверхности его частиц. Увеличение размера удельной поверхности приводит к улучшению характеристик бетона благодаря заполнению имеющихся в бетоне пустот и повышению его плотности. Исследователи [15] доказали, что уменьшение размера наночастиц способствует увеличению прочности бетона с нанодобавками.

Однако вопрос оптимального процентного содержания наноразмерных частиц при замене цемента в бетоне остается открытым и требует дальнейшего изучения. В случае традиционных бетонов авторы [16] сообщили, что добавление 0,25 % наночастиц SiO_2 увеличило прочность бетона на сжатие и изгиб после 28 дней твердения на 10 и 25 % соответственно. Исследователи [17] изучали влияние нанокремнезема на прочность самоуплотняющихся бетонов. Нанокремнезем использовался для частичной замены цемента в концентрациях 0,5; 0,7 и 1 %. Результаты испытаний на прочность при сжатии в возрасте 7, 28, 90 и 365 дней показали, что наилучшие показатели достигаются при замене 0,5 % цемента нанокремнеземом, независимо от возраста испытываемых образцов. Исследование [18] показало, что введение 4 % нанокремнезема от массы цемента обеспечивает оптимальное улучшение механических свойств самоуплотняющихся бетонов.

Несмотря на положительные результаты, полученные при использовании наноматериалов в строительстве, ряд исследований выявил, что их применение в производстве бетона не всегда приводит к значительному улучшению механических свойств. Согласно [19], использование nano-SiO_2 и nano-TiO_2 при изготовлении цементных паст и строительных растворов не продемонстрировало существенного повышения прочности при сжатии. Кроме того, некоторые авторы [20] отметили негативное влияние высоких доз нанокремнезема на прочность бетона, что объяснялось проблемами диспергирования и агрегатированием частиц.

Многие исследователи отмечают, что применение большого количества наночастиц SiO_2 (более 5 % заменителя цемента) может привести к негативному воздействию на механические свойства цементных материалов [21–22]. Это может быть обусловлено высокой удельной поверхностью наночастиц SiO_2 , что способствует их агломерации и ухудшает диспергирование в цементной матрице [23–24]. Для равномерного распределения наночастиц могут потребоваться специальные методы диспергирования, такие как ультразвуковое перемешивание, что значительно увеличивает затраты на изготовление нанодисперсных модификаторов [25–26].

В целях повышения экономической эффективности бетона в его состав вводят минеральные добавки, полученные из промышленных отходов [27]. Отходы тепловых электростанций, такие как золошлаковые отходы и зола-унос, являются одними из наиболее массовых видов вторичного сырья. В [28–29] обоснована техническая возможность и экономическая целесообразность использования золы-уноса в качестве добавки к цементу, а также возможность повышения ее активности за счет процесса механоактивации.

В последнее время было проведено значительное количество исследований по изучению возможностей использования отходов и побочных продуктов металлургической промышленности в качестве добавок к цементу [30]. Металлургические шлаки обладают пуццолановыми свойствами, что делает их перспективными материалами для использования в производстве цемента или бетона. Многими авторами изучены возможности применения гранулированных доменных шлаков в качестве тонкомолотой активной минеральной добавки к бетону [31–33].

Между тем различные виды строительных отходов, такие как бой кирпича, представляют собой ценное сырье, которое может быть эффективно использовано в производстве бетона. Большинство строительных кирпичей содержат в своем составе диоксид кремния и глинозем, что позволяет отнести их к пуццолановым материалам, которые при взаимодействии с водой в процессе гидратации проявляют связующий эффект и способствуют образованию геля C-S-H. Использование порошков пуццолановых материалов в производстве бетона повышает его прочностные характеристики. Раци-

ональное использование подобного рода материалов способствует снижению истощения природных минеральных ресурсов и уменьшению объемов отходов, направляемых на полигоны. Разработка новых составов бетона с применением ультрадисперсных армирующих добавок, полученных из строительных отходов, позволит уменьшить расход цемента, при этом в значительной степени защитив окружающую среду, снизив общую стоимость конструкции и повысив ее долговечность.

Анализ литературных источников показал, что введение в состав бетонной смеси дисперсных армирующих добавок позволяет создавать новые виды высокопрочных бетонов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Механические характеристики модифицированных бетонных смесей зависят от химического состава, структуры, размера и объемной доли этих компонентов в общей массе бетона. При этом более высокие результаты демонстрируют тонкодисперсные добавки, способствующие достижению максимальной плотности упаковки смеси. Такая оптимизированная упаковка частиц приводит к формированию более плотной структуры бетона, что, в свою очередь, улучшает его механические свойства.

На основании анализа научной литературы сделан вывод о целесообразности использования дисперсных добавок, полученных из отходов строительной промышленности, в частности кирпичного боя, в качестве модификаторов бетонной смеси. Для подтверждения этой гипотезы проведены комплексные исследования, направленные на изучение влияния данных добавок на механические характеристики бетонов. **Цель исследования** — изучение механических характеристик бетонов, модифицированных ультрадисперсными порошками строительных отходов. В рамках исследования рассмотрены строительные отходы, представляющие собой бой кирпичей, формирующийся при демонтаже жилых и промышленных зданий и сооружений.

2. Методы

В качестве модификатора бетона был выбран ультрадисперсный порошок (УДП), полученный путем тонкого измельчения образцов строительных отходов. Для проведения исследований битый кирпич (брак производства) подвергался дроблению в шаровой мельнице и последовательному просеиванию через ряд лабораторных сит с ячейками размером 1,5; 0,63; 0,315; 0,08; 0,045 и 0,026 мм на вибростоле. Для измельчения строительных отходов применялась мельница шаровая двухпозиционная WiseMix BML-2 (производства фирмы Daihan Scientific), предназначенная для получения мелких фракций обрабатываемого материала.

Таблица 1 / Table 1

Материал для получения модификаторов бетонной смеси
Material for obtaining concrete mix modifiers

Облицовочный кирпич гладкий Браер 0,7 NF (образец № 1) ООО «ТД БРАЕР» (Российская Федерация) / Braer 0.7 NF smooth facing brick (sample No. 1) “TD BRAER” LLC (Russian Federation)	
Шамотный кирпич ШБ-5 (образец № 2) Богдановическое ОАО «Огнеупоры» (Российская Федерация) / SB-5 fireclay brick (sample No. 2) Bogdanovich “Ogneupory” JSC (Russian Federation)	
Облицовочный кирпич М 200 1NF (образец № 3) Железногорский кирпичный завод (Российская Федерация) / М 200 1NF facing brick (sample No. 3) Zheleznogorsk Brick Factory (Russian Federation)	

И с т о ч н и к: выполнено М.Ю. Мальковой, А.С. Горшковым, А.Н. Задирановым, Е.А. Ларионовым
S o u r c e: made by M.Yu. Malkova, A.S. Gorshkov, A.N. Zadiranov, E.A. Larionov

В лабораторных условиях было разработано и протестировано несколько составов бетонных смесей, полученных путем частичной замены цемента на различные процентные доли УДП, полученных путем измельчения отходов кирпичей разных марок (табл. 1). Для модифицирования цементной смеси был выбран УДП самой мелкой из полученных фракций ($-0,045+0,026$ мм). Этот выбор обусловлен наибольшей площадью реакционной поверхности данной фракции, что потенциально улучшает характеристики конечного материала.

Для оценки влияния УДП строительных отходов на механические свойства цементных растворов были изготовлены и испытаны на прочность образцы кубической формы с длиной ребер 70 мм. Образцы изготавливали и испытывали сериями по 5 штук в каждой. Бетонная смесь для приготовления контрольного образца была составлена без добавления УДП. В остальных образцах цемент был частично заменен на различные доли УДП для получения наномодифицированных составов бетона. С целью корректной оценки влияния добавок УДП на механические свойства бетона все смеси были приготовлены с одинаковым соотношением воды, вяжущего и заполнителей (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Состав бетонной смеси в пересчете на 343 см³ (объем образца кубической формы с длиной ребра 70 мм)
Composition of the concrete mix in terms of 343 cm³ (volume of a cubic sample with edge length of 70 mm)

Состав бетонной смеси / Composition of the concrete mix	Бетон без добавок УДП (В22,5) — контрольный образец / Concrete without UDP additives (В22.5) — control sample	Бетон с добавлением УДП, % от массы цемента / Concrete with the addition of ultradisperse powder (UDP), % by weight of cement				
		10	20	30	35	50
УДП / UDP, %	0	14,4	28	42,8	50,4	72,0
Цемент (ПЦ 500), г / Portland cement (grade 500), g	144,0	129,6	115,2	101,0	93,6	72,0
Песок, г / Sand, g	236,7	235,6	224	218,0	223,6	240,0
Щебень 5–20 мм, г / Crushed aggregate 5–20 mm, g	378,0	381,2	386,6	391,0	383,0	360,0
Вода, г / Water, g	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0

Источники: выполнено М.Ю. Мальковой, А.С. Горшковым, А.Н. Задирановым, Е.А. Ларионовым
 Source: made by M.Yu. Malkova, A.S. Gorshkov, A.N. Zadiranov, E.A. Larionov

Для определения механических свойств затвердевшего бетона были проведены исследования прочности образцов на сжатие. Прочность при сжатии является ключевым параметром, отражающим механические свойства бетона, поскольку она тесно связана с показателями прочности на изгиб и растяжение [34]. Испытания осуществлялись на образцах, выдержанных в течение 7, 14, 21 и 28 сут в трех параллельных сериях. В ходе анализа использовались средние значения из трех измерений.

3. Результаты и обсуждение

Результаты исследования прочности бетона на сжатие в сравнении с контрольной смесью в различные возрастные периоды представлены в табл. 3 и на рисунке.

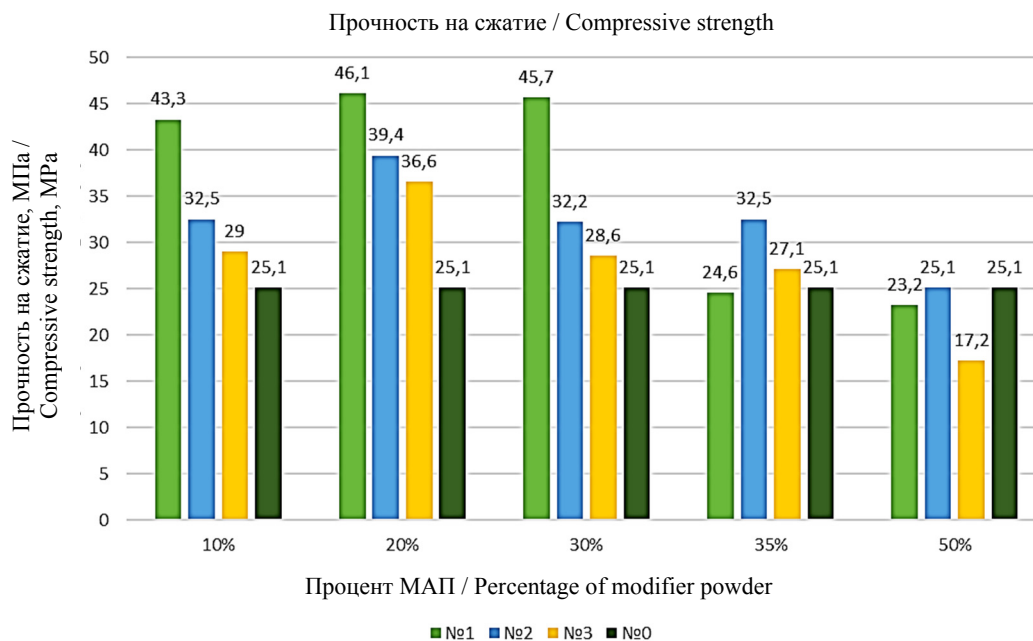
Анализ полученных данных показывает, что прочность бетона на сжатие повышается с увеличением времени выдержки при любом содержании модифицирующих добавок УДП. Эта тенденция наблюдается во всех возрастных группах, что свидетельствует о стабильном повышении прочности бетона. В возрасте 28 дней прочность на сжатие достигает своего максимального значения при испытании всех образцов. Улучшение механических свойств бетонных образцов можно объяснить высокой плотностью упаковки ультрадисперсных частиц в структуре бетона, что способствует увеличению компактности и прочности материала. Кроме того, большая площадь поверхности ультрадисперсных частиц способствует интенсификации химических реакций, что приводит к образованию дополнительного количества C-S-H геля. Этот гель уплотняет и укрепляет границу раздела между заполнителем и цементным тестом, что также способствует повышению прочности бетона.

Таблица 3 / Table 3

Результаты испытаний образцов бетона на сжатие через 7, 14, 21 и 28 сут
Results of compression testing of concrete samples after 7, 14, 21 and 28 days

Время выдержки образца, сут / Sample curing time, days	7	14	21	28
Образцы бетона / Concrete Samples	Напряжение, МПа / Stress, MPa			
Контрольный образец, № 0 / Control sample, No. 0	14,4	17,9	19,2	25,101
№ 1 10 % УДП № 1 / UDP No. 1	31,888	37,676	39,776	43,332
№ 1 20 % УДП № 1 / UDP No. 1	36,869	39,048	41,742	46,112
№ 1 30 % УДП № 1 / UDP No. 1	34,332	38,894	41,231	45,759
№ 1 35 % УДП № 1 / UDP No. 1	15,686	19,881	22,226	24,665
№ 1 50 % УДП № 1 / UDP No. 1	15,421	19,001	21,042	23,215
№ 2 10 % УДП № 2 / UDP No. 2	19,688	27,62	29,433	32,540
№ 2 20 % УДП № 2 / UDP No. 2	27,531	32,32	36,06	39,400
№ 2 30 % УДП № 2 / UDP No. 2	19,433	23,98	29,14	32,261
№ 2 35 % УДП № 2 / UDP No. 2	19,674	25,09	29,32	32,531
№ 2 50 % УДП № 2 / UDP No. 2	15,441	20,012	23,22	25,078
№ 3 10 % УДП № 3 / UDP No. 3	19,995	25,02	27,34	29,021
№ 3 20 % УДП № 3 / UDP No. 3	24,606	30,01	32,98	36,615
№ 3 30 % УДП № 3 / UDP No. 3	18,872	23,87	26,44	28,595
№ 3 35 % УДП № 3 / UDP No. 3	17,331	22,30	25,21	27,078
№ 3 50 % УДП № 3 / UDP No. 3	11,24	14,36	16,02	17,225

И с т о ч н и к: выполнено М.Ю. Мальковой, А.С. Горшковым, А.Н. Задирановым, Е.А. Ларионовым
 Source: made by M.Yu. Malkova, A.S. Gorshkov, A.N. Zadiranov, E.A. Larionov



Сравнительная диаграмма прочности на сжатие образцов бетона с добавлением
 10, 20, 30, 35 и 50 % УДП № 1, УДП № 2 и УДП № 3 по сравнению с контрольным образцом № 0 /
 Comparative diagram of compressive strength of concrete samples with the addition
 of 10, 20, 30, 35 and 50% UDP No. 1, UDP No. 2 and UDP No. 3 compared to control sample No. 0

И с т о ч н и к: выполнено М.Ю. Мальковой, А.С. Горшковым, А.Н. Задирановым, Е.А. Ларионовым
 Source: made by M.Yu. Malkova, A.S. Gorshkov, A.N. Zadiranov, E.A. Larionov

В результате анализа данных испытаний бетонных образцов на прочность, проведенных в возрасте 28 суток и представленных в сводной табл. 3, было установлено, что ключевым фактором, определяющим прочность бетона при сжатии, является концентрация УДП в составе бетонной смеси. Максимальные показатели прочности были достигнуты при введении УДП в количестве 20 % от массы цемента.

При дальнейшем повышении содержания УДП в бетоне было отмечено менее значительное увеличение прочности бетонных образцов на сжатие по сравнению с контрольным образцом, а в случае превышения содержания УДП более 50 % от массы цемента прочностные характеристики на сжатие снижаются относительно контрольного образца. Такое снижение эксплуатационных характеристик может быть объяснено избытком УДП, которое приводит к агломерации и недостаточному диспергированию частиц УДП в цементной матрице, что способствует образованию в матрице слабых зон, приводящих к снижению прочности бетона [35]. Снижение прочности также может быть вызвано осаждением C-S-H геля на поверхности агломерированных частиц, что препятствует взаимодействию частиц внутри агломерата с зернами цемента и возможности вступать с ним в химическую реакцию. Следовательно, при увеличении коэффициента замещения цемента на УДП свыше 20 % наблюдается уменьшение эффекта увеличения прочности бетона вплоть до отрицательного значения.

Для проверки гипотезы о влиянии размеров УДП на прочность бетона провели исследование образцов с добавлением 20 % УДП более крупной фракции ($-0,08+0,045$ мм). С этой целью были залиты и испытаны на прочность образцы кубической формы с длиной ребер 70 мм, объединенные в серии по 5 штук. Результаты испытаний продемонстрировали, что введение в состав цементной смеси УДП крупной фракции ($-0,08+0,045$ мм) не только не обеспечивает повышения прочностных характеристик бетонных образцов, но, наоборот, приводит к снижению их прочности по сравнению с контрольным образцом.

Снижение эксплуатационных характеристик, вероятно, обусловлено крупным размером частиц микроармирующего наполнителя (УДП), что препятствует их проникновению в мелкие поры бетона. Кроме того, порошки более крупной фракции уменьшают площадь реакционной поверхности, теряя свою реакционную способность и превращаясь в инертные заполнители [36]. Это способствует увеличению пористости бетона и снижению его прочности на сжатие.

Эта тенденция свидетельствует о том, что при прочих равных параметрах мелкодисперсные УДП, обеспечивая более развитую площадь поверхности при заданной массе, индуцируют образование большего числа зародышей, способных участвовать в химических реакциях, что приводит к снижению концентрации пор в бетоне и повышению его плотности.

4. Заключение

Разработаны составы бетонных смесей, содержащих в качестве специальной добавки ультрадисперсные порошки строительных кирпичей фракции ($-0,045+0,026$ мм).

1. Установлено, что применение УДП в составе бетонной смеси обуславливает значительное качественное улучшение их физико-механических свойств по сравнению с традиционными составами, обеспечивая достижение бетонными образцами показателей прочности на сжатие в диапазоне 36,615–46,112 МПа, коэффициента упругости — в диапазоне 47,84–51,70 ГПа.

2. Наилучшие механические показатели бетона обеспечивает добавка к цементу 20 % УДП. Прочность на сжатие бетонных образцов, содержащих 20 % УДП, через 28 дней выдержки превышает контрольные значения на 46 %.

3. Использование более высоких дозировок УДП (более 35 % заменителя цемента) приводит к негативному воздействию на механические свойства бетона, что может быть связано с агломерацией ультрадисперсных частиц, препятствующей их равномерному распределению в цементной матрице. Ультрадисперсные порошки строительных отходов обладают значительным потенциалом для улучшения эксплуатационных свойств бетонных конструкций. Их применение направлено на повы-

шение механических свойств бетона. Кроме того, использование данных порошковых материалов способствует сокращению производственных издержек на изготовление строительных изделий, что обуславливает их экономическую целесообразность.

Список литературы / References

1. Smith J., Cusatis G., Pelessone D., Landis E., O'Daniel J., Baylot J. Discrete modeling of ultra-high-performance concrete with application to projectile penetration. *International Journal of Impact Engineering*. 2014;65:13–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.10.008>
2. Abbas R. Influence of nano-silica addition on properties of conventional and ultra-high performance concretes. *Housing and building national research center*. 2009;5(1):18–30. Available from: <https://sid.ir/paper/649683/en212qw> (accessed: 22.09.2024)
3. Rong Zh., Sun W., Xiao H., Jiang G. Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2015;56:25–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.001>
4. Schröfl Ch., Gruber M., Plank J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*. 2012;42(11):1401–1408. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.08.013>
5. Ravindra K.D., Henderson N.A. *Specialist Techniques and Materials for Concrete Production*. Thomas Telford Publ.; Thomas Telford Ltd; 1999. ISBN: 978-0-7277-2825-8
6. Zhang P., Wan J., Wang K., Li Q. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2017;148:648–658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059> EDN: YETSVO
7. Bjornstrom J., Matic A., Borjesson L., Panas I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*. 2004;392(1–3):242–248. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.05.071> EDN: KEDYZN
8. Zhao Z.Q., Sun R.J., Xin G.F., Wei S.S., Huang D.W. A Review: Application of Nanomaterials in Concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;405-408:2881–2884. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.2881>
9. Morsy M.S., Alsayed S.H., Aqel M. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2011;25(1):145–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.046>
10. Rong Zh., Sun W., Xiao H., Jiang G. Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 2015;56:25–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.001>
11. Atmaca N., Abbas M.L., Atmaca A. Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2017;147:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.156>
12. Mohamed A.M. Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete. *HBRC Journal*. 2016;12(2):212–225. <https://doi.org/10.1016/j.hbrej.2014.11.006>
13. Schröfl Ch., Gruber M., Plank J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*. 2012;42:1401–1408. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.08.013>
14. Alhawati M., Ashour A., El-Khoja A. Influence of using different surface areas of nano silica on concrete properties. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2146(1):020007. <https://doi.org/10.1063/1.5123694>
15. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete — a review. *Construction and Building Materials*. 2010;24(11):2060–2071. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.03.014> EDN: NAKRSB
16. Sobolev K., Flores I., Torres-Martinez L.M., Valdez P.L., Zarazua E., Cuellar E.L. Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement based materials. In: Bittnar Z., Bartos P.J.M., Němeček J., Šmilauer V., Zeman J. (eds.) *Nanotechnology in Construction 3*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009. p. 139–148 https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8_18
17. Zaki S.I., Ragab Khaled S. How nanotechnology can change concrete industry. In: *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*. Oran, Algeria. 2009;1:407–414. ISSN 2170–0095
18. Nazari A., Riahi S. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Compos. Eng.* 2011;42(3):570–578. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2010.09.025>
19. Senff L., Hotza D., Lucas S., Ferreira V.M., Labrincha J.A. Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars. *Materials Science and Engineering*. 2012;A 532:354–361. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.102>

20. Hosseini P., Booshehrian A., Madari A. Developing concrete recycling strategies by utilization of nano-SiO₂ particles. *Waste and Biomass Valorization*. 2011;2(3):347–355. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9071-9> EDN: VEZHBS
21. Senff L., Hotza D., Repette W.L., Ferreira V.M., Labrincha J.A. Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design. *Constr. Build. Mater.* 2010;24:1432–1437. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.012> EDN: OEJPTD
22. Najigivi A., Khaloo A., Iraj Zad A., Abdul Rashid S. Investigating the effects of using different types of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B Engineering*. 2013;54:52–58. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.035>
23. Kong D., Su Y., Du X., Yang Y., Wei S., Shah S.P. Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2013;43:557–562. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01598-z>
24. Haruehansapong S., Pulngern T., Chucheeesakul S. Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. *Constr. Build. Mater.* 2014;50:471–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.002>
25. Kim J.J., Rahman M.K., Al-Majed A.A., Al-Zahrani M.M., Reda Taha M.M. Nanosilica effects on composition and silicate polymerization in hardened cement paste cured under high temperature and pressure. *Cem. Concr. Compos.* 2013;43:78–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.002>
26. Zyganitidis I., Stefanidou M., Kalfagiannis N., Logothetidis S. Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering B*. 2011;176(19):1980. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.05.005>
27. Li L.G., Zhu J.Y., Kwan A.K.H. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. *Construction and Building Materials*. 2018;168:622–632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.181>
28. Barabanshchikov Y., Usanova K. A Cementless Binder Based on High-Calcium Fly Ash, Silica Fume, and the Complex Additive Ca(NO₃)₂ + MgCl₂: Phase Composition, Hydration, and Strength. *Buildings*. 2024;14(7):2121. <https://doi.org/10.3390/buildings14072121> EDN: HUHIAZ
29. Mohammed B.S., Adamu M., Liew M.S. Evaluating the effect of crumb rubber and nano silica on the properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement using non-destructive techniques. *Case studies in construction materials*. 2018;8:380–391. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.004>
30. Shi C., Qian J. High performance cementing materials from industrial slags — a review. *Resources Conservation and Recycling*. 2000;29(3):195–207. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00060-9)
31. Nazari A., Riahi S. The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(s 4–5):2149–2157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.064>
32. Chithra S., Senthil Kumar S.R.R., Chinnaraju K. The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high-performance concrete with copper slag as partial fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 2016;113:794–804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.119>
33. Shobeiri V., Bree Bennett B., Xie T., Visintin P. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01832. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832> EDN: CZMPWZ
34. Nesvetaev G.V., Kuzmenko T.G. On the ratio of flexural and compressive strength of cement concrete. *Engineering journal of Don*. 2023;(8):304–316. (In Russ.) EDN: KCHUVU
Несветаев Г.В., Кузьменко Т.Г. О соотношении пределов прочности цементных бетонов на растяжение при изгибе и сжатии // Инженерный вестник Дона. 2023. № 8 (104). С. 304–316. EDN: KCHUVU
35. Haruehansapong S., Pulngern T., Chucheeesakul S. Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*. 2014;50:471–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.002>
36. Givi A.N., Rashid S.A., Aziz F.N.A., Salleh M.A.M. Influence of 15 and 80 nano-SiO₂ particles addition on mechanical and physical properties of ternary blended concrete incorporating rice husk ash. *Journal of Experimental Nanoscience*. 2013;8(1):1–18. <https://doi.org/10.1080/17458080.2010.548834>